

15This Page Is Inserted by IFW Operations  
and is not a part of the Official Record

## **BEST AVAILABLE IMAGES**

Defective images within this document are accurate representations of the original documents submitted by the applicant.

Defects in the images may include (but are not limited to):

- BLACK BORDERS
- TEXT CUT OFF AT TOP, BOTTOM OR SIDES
- FADED TEXT
- ILLEGIBLE TEXT
- SKEWED/SLANTED IMAGES
- COLORED PHOTOS
- BLACK OR VERY BLACK AND WHITE DARK PHOTOS
- GRAY SCALE DOCUMENTS

**IMAGES ARE BEST AVAILABLE COPY.**

**As rescanning documents *will not* correct images,  
please do not report the images to the  
Image Problem Mailbox.**





①9 BUNDESREPUBLIK  
DEUTSCHLAND



DEUTSCHES  
PATENTAMT

①2 Off ni gungsschrift  
①0 DE 196 24 421 A 1

⑤1 Int. Cl.<sup>6</sup>:  
G 01 N 21/41  
G 01 M 11/02  
G 02 B 21/00

②1 Aktenzeichen: 196 24 421.8  
②2 Anmeldetag: 19. 6. 96  
④3 Offenlegungstag: 2. 1. 97

DE 196 24 421 A 1

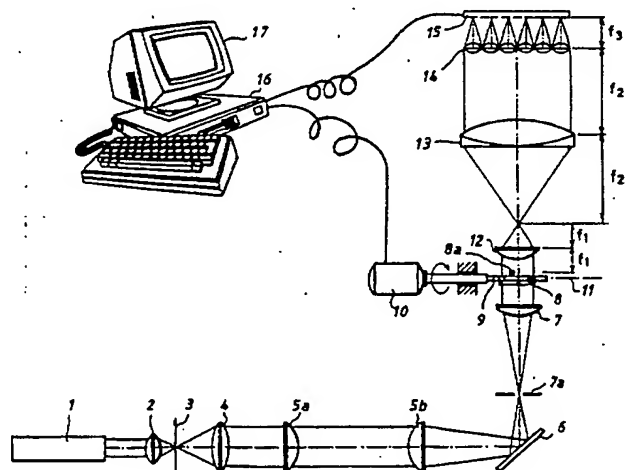
③0 Innere Priorität: ③2 ③3 ③1  
30.06.95 DE 195238524

⑦1 Anmelder:  
Fa. Carl Zeiss, 89518 Heidenheim, DE

⑦2 Erfinder:  
Freimann, Rolf, Dr., 73431 Aalen, DE

⑤4 Vorrichtung und Verfahren zur orts aufgelösten Vermessung von Wellenfrontdeformationen

⑤7 Die Erfindung betrifft ein Verfahren und eine Vorrichtung zur orts aufgelösten Vermessung der von einem mikroskopischen Objekt erzeugten Wellenfrontdeformationen. Die Vorrichtung enthält eine Beleuchtungsoptik, die einen kollimierten Strahlengang erzeugt. Das mikroskopische Objekt (8) wird mit dem kollimierten Lichtstrahl in Durchlicht beaufschlagt. Detektorseitig enthält die Vorrichtung ein afokales Fernrohrsystem aus einem Mikroskopobjektiv (12) und einem Achromaten (13) und einen dem afokalen Fernrohrsystem nachgeordneten Shack-Hartmann-Wellenfrontsensor aus einem Linienarray (14) und einem in der Brennebene des Linienarrays (14) angeordneten Detektorarray (15). Das mikroskopische Objekt (8) ist in der eintrittsseitigen Brennebene und das Linienarray (14) in der austrittsseitigen Brennebene des afokalen Systems angeordnet. Für die Aufnahme des Objektes (8) ist ein Objektisch (9, 10) vorgesehen, der um eine zur optischen Achse der Meßanordnung senkrechte Achse drehbar ist. Bei Messung der optischen Wellenlängenunterschiede bei unterschiedlichen Winkelstellungen des Objektes (8) kann eine tomographisch Auswertung im Computer (16) erfolgen, so daß der Brechungsindex-Verlauf als Funktion der drei Raumrichtungen im Objekt orts aufgelöst bestimmt werden kann. In einem alternativen Ausführungsbeispiel ist die Lichtwellenlänge des Beleuchtungsstrahlenganges durchstimmbar, so daß auch die Dispersion orts aufgelöst bestimmt werden kann.



DE 196 24 421 A 1

## Beschreibung

Durchdringt ein Lichtstrahl ein Objekt, so verursachen Dickenvariationen oder, bei einer konstanten Dicke des Objektes, räumliche Brechzahlvariationen eine Deformation der Wellenfront des Lichtstrahls. Durch eine quantitative Bestimmung der Wellenfrontdeformation läßt sich der Brechungsindex als Funktion des Ortes und damit vorhandene Inhomogenitäten des Brechungsindex bestimmen.

Aus der DE-C2-30 03 333 ist eine Vorrichtung zur Messung von Inhomogenitäten des Brechungsindex bekannt, bei der die zu analysierende Probe mit einem kollimierten Lichtstrahl durchleuchtet wird und die durch die Inhomogenitäten des Brechungsindex verursachten Strahlablenkungen mittels eines hinter einer Blende angeordneten Detektors detektiert werden. Die räumliche Auflösung der Messung ist dabei durch die Abmessungen des kollimierten Strahls bestimmt. Soll zumindest ein größerer zweidimensionaler Bereich der Probe orts aufgelöst vermessen werden, so ist eine Vielzahl an Einzelmessungen erforderlich, zwischen denen die Probe jeweils relativ zum Meßstrahl verschoben wird. Dadurch ist die Vermessung eines zweidimensionalen Objektfeldes sehr zeitaufwendig. Die orts aufgelöste Vermessung von Brechungsindex-Inhomogenitäten in drei räumlichen Dimensionen ist mit der Vorrichtung überhaupt nicht vorgesehen.

In der US-A-4,930,893 sind mehrere weitere Anordnungen zur räumlich aufgelösten Vermessung von Brechungsindex-Inhomogenitäten beschrieben. Ein Teil der Anordnungen basiert auf interferometrischen Anordnungen, bei denen die erzeugten Interferogramme mit einer CCD-Kamera aufgezeichnet werden. Dadurch können auch größere Objektfelder ohne ein Abrastern der Probe orts aufgelöst vermessen werden. Allerdings müssen zur Auswertung jeweils mehrere Interferogramme bei unterschiedlichen Phasenverschiebungen zwischen dem Meß- und dem Referenzstrahl herangezogen werden.

Bei einem anderen Teil der beschriebenen Anordnungen wird wiederum die räumliche Ablenkung eines Lichtstrahls aufgrund der Brechzahl-Inhomogenitäten bestimmt. Für die orts aufgelöste Messung muß das Objekt mit dem Lichtstrahl abgerastert werden. Der Zeitaufwand für die orts aufgelöste Messung wird damit auch hier vergleichbar zu dem der eingangs genannten DE-C2-30 03 333.

Desweiteren sind zur orts aufgelösten Vermessung von Wellenfronten über makroskopische Strahlprofile sogenannte Shack-Hartmann-Wellenfrontsensoren bekannt. Sie bestehen im wesentlichen aus einem Linsenarray mit einer zweidimensionalen Anordnung von Linsen gleicher Brennweite und einem in der Brennebene der Linsen angeordneten Detektorarray. Die Abweichung der einfallenden Wellenfront gegenüber einer ebenen Wellenfront verursacht bei diesen Shack-Hartmann-Sensoren Ablenkungen der Foki auf dem Detektorarray, die zur Auswertung herangezogen werden. Jede Einzellinse des Linsenarrays mit dem zugehörigen Bereich des Detektorarrays stellt dabei einen Teilsensor dar, der einen Ausschnitt der einfallenden Wellenfront vermißt. Ein solcher Shack-Hartmann-Sensor, der beispielsweise in der DE-C2 40 07 321 beschrieben ist, ermöglicht daher die simultane Parallelvermessung in mehreren räumlichen Bereichen.

Die vorliegende Erfindung soll ein Verfahren und eine Vorrichtung angeben, mit der eine Vermessung der von einem mikroskopischen Objekt erzeugten Wellenfrontdeformationen an mehreren Stellen des Objektes simultan möglich ist. In einer bevorzugten Ausführungsform des Verfahrens und der Vorrichtung soll der Verlauf des Brechungsindex der Probe in zwei oder drei zueinander senkrechten Raumrichtungen orts aufgelöst bestimmbar sein.

Dieses Ziel wird durch eine Vorrichtung mit den Merkmalen des Anspruches 1 und ein Verfahren mit den Merkmalen des Anspruches 13 gelöst. Vorteilhafte Ausgestaltungen der Erfindung ergeben sich aus den Merkmalen der abhängigen Ansprüche.

Die erfindungsgemäße Vorrichtung umfaßt demnach eine einen Beleuchtungsstrahlengang erzeugende Beleuchtungsoptik, einen Objektträger zur Aufnahme des zu vermessenden Objektes im Beleuchtungsstrahlengang sowie einen Shack-Hartmann-Wellenfrontsensor, mit dem die vom Objekt verursachten Wellenfrontdeformationen in Durchlicht orts aufgelöst detektiert werden. Der Shack-Hartmann-Wellenfrontsensor ist dabei in bekannter Weise aus einem Linsenarray und einem Detektorarray in der Brennebene der Einzellinsen des Linsenarrays aufgebaut.

Für die Vermessung mikroskopischer Objekte sollte zusätzlich zwischen dem Objektträger und dem Linsenarray ein afokales optisches System angeordnet sein, dessen objektseitige Brennweite wesentlich kleiner als dessen detektorseitige Brennweite ist. Dieses afokale System wirkt als umgekehrtes Fernrohr, durch das der Strahlengang zwischen dem mikroskopischen Objekt und dem Linsenarray um das mindestens Fünffache, vorzugsweise um mindestens das 10-fache oder 20-fache in etwa auf die Lateralabmessungen des Linsenarrays vergrößert wird. Ein solches afokales System kann beispielsweise aus einem objektseitigen Mikroskopobjektiv und einem linsenarrayseitigen Achromaten bestehen.

Für die Auswertung der Wellenfrontdeformation ist es desweiteren vorteilhaft, wenn das Linsenarray in der austrittseitigen Brennebene und die dem afokalen System zugewandte Objektoberfläche in der eintrittseitigen Brennebene des afokalen Systems angeordnet ist. Durch das afokale System erhält die am Objekt vorhandene Wellenfrontdeformation lediglich eine dem Verhältnis der beiden Brennweiten des afokalen Systems entsprechende laterale Streckung, wird jedoch ansonsten ohne zusätzliche Deformation übertragen.

Bei einem weiterhin vorteilhaften Ausführungsbeispiel ist der Objektträger um eine zur optischen Achse der Beleuchtungsoptik senkrechte Achse drehbar. Zusätzlich sollte die Winkelstellung des Objektträgers, beispielsweise mittels eines Winkelgebers, meßbar sein. Dadurch können mehrere Messungen bei unterschiedlichen Winkelstellungen des Objektes durchgeführt werden und nachfolgend durch eine zur Computer-Tomographie ähnliche Auswertung der Meßergebnisse der Brechungsindexverlauf innerhalb des Objektes in drei zueinander senkrechten Richtungen ermittelt werden.

Für die Auswertung der Meßergebnisse sollte ein Computer mit einem Computer-Programm vorgesehen sein, das die räumlichen Ablagen der auf dem Detektorarray erzeugten Foki von den Lagen der im Falle des

Einfalls einer ebenen Wellenfront erzeugten Lichtpunkte ermittelt. Für eine einfache Darstellung können einfach diese räumlichen Ablagen zur graphischen Darstellung eines zweidimensionalen Bildes an einen Monitor ausgegeben werden. Zusätzlich kann das Computer-Programm derart ausgelegt sein, daß aus den räumlichen Ablagen der Brechungsindex des Objektes orts aufgelöst bestimmt wird und der orts aufgelöste Verlauf des Brechungsindex als Bild ausgegeben wird.

Da der Brechungsindex im allgemeinen von der Wellenlänge des Meßlichts abhängig ist, sollte grundsätzlich jede Einzelmessung mit monochromatischem oder nahezu monochromatischem Licht durchgeführt werden und eine entsprechende monochromatische Lichtquelle vorgesehen sein. Besonders vorteilhaft ist es jedoch, wenn die Lichtquelle monochromatisch und durchstimmbar ist oder wenn die Lichtquelle polychromatisch ist und ein nachgeschalteter durchstimmbarer Monochromator vorgesehen ist. Durch Messungen bei unterschiedlichen Lichtwellenlängen ist dann zusätzlich zum räumlichen Verlauf des Brechungsindex auch der räumliche Verlauf der Dispersion ermittelbar. Zur Bestimmung der Dispersion sollte dann der Computer auch ein die eingestellte Lichtwellenlänge charakterisierendes Signal erhalten.

Nachfolgend werden Einzelheiten der Erfindung anhand der in den Figuren dargestellten Ausführungsbeispiele näher erläutert. Im einzelnen zeigen:

Fig. 1 eine schematische Darstellung des Strahlenganges eines ersten Ausführungsbeispiels der Erfindung für Durchlichtmessungen;

Fig. 2 eine schematische Darstellung des Strahlenganges in einer alternativen Beleuchtungsoptik;

Fig. 3a—d Diagramme in denen jeweils je nach Betriebsmode unterschiedliche orts aufgelöste Objekteigenschaften dargestellt sind;

Fig. 4 ein Diagramm der vom Computer gesteuerten Funktionsabläufe bei unterschiedlichen Meßaufgaben.

In der Fig. 1 ist mit (1) der das Meßlicht erzeugende Laser, beispielsweise ein HeNe-Laser mit einer Emissionswellenlänge von 544 nm, bezeichnet. Ein dem Laser nachgeschaltetes schwaches Mikroskopobjektiv fokussiert den Laserstrahl auf ein Pinhole (3), das als Modenblende dient. Nachfolgend wird der Laserstrahl von einer Linse (4) kollimiert und von zwei nachgeschalteten Linsen über einen Umlenkspiegel (6) in die hintere Brennebene (7a) eines Mikroskopobjektivs (7) fokussiert. Aus dem Mikroskopobjektiv (7) tritt demzufolge ein kollimierter Lichtstrahl aus, der auf das Objekt (8) einfällt. Das Objekt (8) ist auf einem Objektstisch (9) positioniert, der mittels eines Motors (10) mit einem Winkel-Encoder um eine zur optischen Achse senkrechte Achse (11) drehbar ist. Die Drehwinkelposition des Objektstisches (9) wird mittels des Winkel-Encoders gemessen und das Meßergebnis an den Auswerte- und Steuercomputer (16) weitergegeben. Gleichzeitig steuert der Computer (16) auch den Motor (10) des Objektstisches (9) an.

Die aus dem Objekt (8) an der detektorseitigen Oberfläche (8a) austretende Wellenfront, die durch das Objekt (8) durch Brechungsindex-Inhomogenitäten oder Dickenunterschiede deformiert ist, durchläuft nachfolgend ein aus einem Mikroskopobjektiv (12) mittlerer bis hoher Vergrößerung und einem Achromaten (13) bestehendes afokales System. Hinter dem afokalen System (12, 13) ist der aus einem Mikrolinsenarray (14) und einem Detektorarray (15) aufgebaute Shack-Hartmann-Sensor angeordnet.

Durch das afokale System (12, 13) wird das aus dem Objekt (8) austretende Strahlenbündel entsprechend dem Verhältnis  $f_2/f_1$  der Brennweite  $f_2$  des Achromaten (13) und der Brennweite  $f_1$  des Mikroskopobjektivs (12) aufgeweitet. Das afokale System (12, 13) ist dabei derart zum Objekt (8) und zum Shack-Hartmann-Sensor (14, 15) angeordnet, daß die objektseitige Brennebene des Mikroskopobjektivs (12) mit der detektorseitigen Oberfläche (8a) des Objektes (8) und die Brennebene des Achromaten (13) mit der Hauptebene des Linsenarrays (14) des Shack-Hartmann-Sensors zusammenfällt. Es läßt sich zeigen, daß bei dieser Anordnung die Wellenfrontform in der Ebene des Linsenarrays (14) der Wellenfrontform an der detektorseitigen Oberfläche (8a) des Objektes (8) entspricht und durch das afokale System lediglich die Wellenfrontform entsprechend dem Verhältnis  $f_2/f_1$  der Brennweiten des Achromaten (13) und des Mikroskopobjektivs (12) lateral gestreckt ist. Bei Verwendung eines Plan-Apochromaten 40x der Anmelderin als Mikroskopobjektiv (12) mit einer Brennweite  $f_1 = 4,11$  mm und einem Achromaten (13) mit Brennweite  $f_2 = 120$  mm ergibt sich beispielsweise eine Strahlaufweitung um den Faktor 29.

Das aus dem Achromaten (13) austretende Licht wird von den Einzellinsen des Mikrolinsenarrays (14) auf das Detektorarray (15) fokussiert. Jede Mikrolinse fokussiert den auf sie fallenden Teil der Wellenfront auf das Detektorarray (15), das als CCD-Kamera ausgebildet ist. Das Detektorarray (15) steht dazu in der hinteren Brennebene des Mikrolinsenarrays. Aus den Ablagen der Foki auf dem Detektorarray (15) wird bei der nachfolgenden Auswertung der Kamerabilder im Computer (16) nach der bekannten Auswertemethode für Shack-Hartmann-Wellenfrontsensoren der laterale Verlauf der Wellenfront berechnet und nachfolgend auf dem Monitor (17) graphisch dargestellt. Ein Shack-Hartmann-Wellenfrontsensor mit der nötigen Auswertesoftware wird beispielsweise von der Anmelderin unter der Bezeichnung "DETECT 16" angeboten. Beim "DETECT 16" enthält das Linsenarray  $16 \times 16$  Einzellinsen, die ein regelmäßiges zweidimensionales Gitter mit im wesentlichen gleichbleibender Gitterkonstante bilden. Die Messung erfolgt daher in  $16 \times 16$  lateralen Teilfeldern des Objektes simultan, also bei einem einzigen Auslesen des Detektorarrays (15). Enthält das Linsenarray (14) eine größere Anzahl an Einzellinsen, so ergibt sich eine simultane Messung in einer entsprechend größeren Anzahl an Teilfeldern.

Bei einfach aufgebauten, stückweise homogenen Objekten (8) mit bekannten geometrischen Abmessungen lassen sich in günstigen Fällen schon aus einer einzigen Messung des lateralen Verlaufs der Wellenfront die Brechungsindizes der homogenen Bereiche berechnen. Um jedoch auch bei komplizierter aufgebauten Objekten den Brechungsindex orts aufgelöst ermitteln zu können, ist es erforderlich, mehrere Messungen des Objektes unter unterschiedlichen Winkeln vorzunehmen. Dazu ist das Objekt (8) auf einem Objektstisch (9) angeordnet, der um eine zur optischen Achse des Strahlenganges senkrechte Achse (11), die in etwa mitten durch das Objekt (8) verläuft, drehbar ist. Der drehbare Objektstisch ist in der Fig. 1 jedoch nur schematisch und stark vereinfacht

dargestellt und kann beispielsweise den in Journal of Microscopy, Vol. 176, Seiten 211—221 beschriebenen Aufbau haben.

Bei der in Fig. 1 dargestellten Anordnung wird von der Beleuchtungsoptik (1—7) ein kollimiertes Strahlenbündel erzeugt, in dem das Objekt (8) angeordnet ist. Setzt man voraus, daß die Gradienten des Brechungsindex innerhalb des Objektes nur gering sind, kann man auch innerhalb des Objektes von einem annähernd kollimierten Strahlenbündel ausgehen.

Zerlegt man einen Lichtstrahl dieses Strahlenbündels in viele kleine Wegelemente, so ist die optische Weglänge des Lichtstrahls gleich der Summe der optischen Weglängen dieser Wegelemente. Man kann daher das gesamte Objekt in viele kleine Volumenelemente zerlegen. Entlang der Lichtstrahlen des parallelen Lichtbündels sind die jeweiligen optischen Weglängen gleich der Summe der optischen Weglängen der durchstrahlten Volumenelemente. Bei gleicher Größe aller Volumenelemente bestimmt im wesentlichen die Summe ihrer Brechungsindizes die optische Weglänge. Aufgrund der Analogie zur Computertomographie wird die Summe der Brechungsindizes nachfolgend Strahlsumme genannt.

Besteht das Linsenarray (14) aus  $N \times N$  Einzellinsen und denkt man sich ein das Objekt umschreibendes Volumen und zerlegt dieses in  $N \times N \times N$  würfelförmige Volumenelemente  $V_{ijk}$  ( $i, j, k = 1, 2, \dots, N$ ) mit identischen Kantenlängen  $d$ , wobei der Index  $i$  jeweils die senkrecht zur optischen Achse liegenden Schnittebenen bezeichnet (alle Volumenelemente, durch die dieselbe zur optischen Achse senkrechte Schnittebene verläuft, haben denselben Index  $i$ , während zur optischen Achse senkrechte Schnittebenen an unterschiedlichen Stellen des Strahlenganges unterschiedliche Indizes  $i$  haben), so ergibt sich die optische Weglänge  $OWL_{jk}$  durch die  $N$  Volumenelemente der Spalte mit den Indizes  $j, k$  zu:

$$OWL_{jk} = \left( \sum_{i=1}^N n_{ijk} \cdot d \right) - N \cdot d \cdot n_0 \quad (1)$$

Dabei ist  $n_0$  der Brechungsindex der Umgebung des Objektes,  $N$  die Anzahl der Volumenelemente längs der Kante des das Objekt umschreibenden Würfels und  $n_{ijk}$  der Brechungsindex des Volumenelements mit den Indizes  $i, j, k$ . Durch einfache Umformung folgt für die Strahlsumme  $S_{jk}$ :

$$S_{jk} = \sum_{i=1}^N n_{ijk} = \frac{OWL_{jk}}{d} + N \cdot n_0 \quad (2)$$

Die Gleichung 2 stellt eine lineare Gleichung für die Brechungsindizes von  $N^3$  Volumenelementen dar. Bei einer einzigen Messung bestimmt die Anordnung  $N^2$  Strahlsummen  $S_{jk}$  entlang des Objektquerschnitts. Für die Bestimmung von  $N^3$  unbekannten Brechungsindizes sind deshalb  $N$  unabhängige Gleichungen des Typs der Gleichung 2 erforderlich. Diese  $N$  Gleichungen erhält man, wenn nacheinander  $N$  Messungen bei  $N$  unterschiedlichen Drehwinkeln durchgeführt werden, wobei allerdings darauf zu achten ist, daß die Drehungen nicht um eine Symmetrieachse des Objekts erfolgen; letzteres ist durch eine geeignete Positionierung des Objektes auf dem Objektisch vor der ersten Messung zu gewährleisten. Aus dem dann erhaltenen linearen Gleichungssystem können die Brechungsindizes  $n_{ijk}$  der Volumenelemente  $V_{ijk}$  beispielsweise mit den Algorithmen bestimmt werden, die aus der Computertomographie bekannt sind. Entsprechende Algorithmen sind beispielsweise in K. Iizuka, Engineering Optics, Second Edition, Springer Series in Optical Sciences, Volume 35, Springer-Verlag, Seiten 295—311, (1986), beschrieben. Das daraus folgende Ergebnis ist der Brechungsindex  $n_{ijk}$  in jedem einzelnen Volumenelement  $V_{ijk}$ , also der orts aufgelöste Brechungsindex. Werden mehrere derartige Messungen nacheinander bei unterschiedlichen Lichtwellenlängen durchgeführt, so erhält man den orts aufgelösten Brechungsindex  $n_{ijk}$  als Funktion der Lichtwellenlänge, woraus sich die Dispersion des Brechungsindex orts aufgelöst ergibt.

Um Abbildungsfehler der Optik bei der Auswertung der Meßergebnisse zu eliminieren, wird vor der eigentlichen Messung zunächst eine Referenzmessung entweder ohne Objekt oder mit einem Objekt mit über den Querschnitt konstanter optischer Dicke durchgeführt. Die Ergebnisse dieser Referenzmessung werden dann später von den Ergebnissen der Messungen am Objekt abgezogen. Bei Vermessung des Objektes unter verschiedenen Winkeln sind keine zusätzlichen Referenzmessungen erforderlich; vielmehr dient immer dieselbe Referenzmessung zur Eliminierung der Abbildungsfehler.

In der Fig. 2 ist der Beleuchtungsstrahlengang eines alternativen Ausführungsbeispiels, das insbesondere für die orts aufgelöste Dispersionsmessung geeignet ist, dargestellt. Es enthält eine polychromatische Lichtquelle, beispielsweise in Form einer Halogenlampe (21), mit einem nachgeschalteten Kollektor (22) zur Erzeugung eines kollimierten Lichtstrahlenbündels. Dem Kollektor (22) ist ein durchstimmbarer Monochromator (23) nachgeschaltet. Der Monochromator (23) kann beispielsweise ein Gittermonochromator mit einem drehbaren Beugungsgitter (24) sein. Für die Erzeugung der Drehbewegung des Gitters (24) ist ein Schrittmotor (24a) mit einem Winkelgeber vorgesehen. Der Schrittmotor (24a) wird vom Computer (16) (siehe Fig. 1) angesteuert und die Winkelposition des Gitters (24) wird mittels des Drehgebers bestimmt und vom Computer (16) ausgelesen, so daß der Computer (16) Information über die durch den Monochromator (23) durchgelassene Lichtwellenlänge erhält.

Aus dem Monochromator (23) tritt demzufolge ein kollimiertes, monochromatisches Strahlenbündel aus, dessen Wellenlänge definiert variierbar ist. Eine dem Monochromator (23) nachgeschaltete Plankonkav-Linse fokussiert den kollimierten Lichtstrahl über einen Umlenkspiegel (26) in die vordere Brennebene (27a) des zur Ausleuchtung des Objektes dienenden Mikroskopobjektivs (27). Aus dem Mikroskopobjektiv (27) tritt demzufolge ein kollimierter Lichtstrahl aus, in dem das zu untersuchende Objekt angeordnet ist. Der weitere Aufbau der Anordnung aus Fig. 2 hinsichtlich des Objektisches (9, 10) und der nachgeschalteten detektorseitigen Optik aus Mikroskopobjektiv (12), Achromat (13), Linsenarray (14) und Detektorarray (15) ist identisch wie im Ausführungsbeispiel nach Fig. 1 und ist deswegen hier nicht noch einmal dargestellt.

In den Fig. 3b—d sind drei Diagramme dargestellt, die sich durch Auswertung der mit der Vorrichtung aufgenommenen Meßergebnisse mit dem Computer (16) ergeben und auf dem Monitor (17) dargestellt werden können. Die Fig. 3a zeigt das Objekt (8) in dessen eigenem Koordinatensystem mit den kartesischen Koordinaten  $x, y, z$ , wobei die  $z$ -Richtung parallel zur optischen Achse der Meßvorrichtung verläuft und die Richtungen  $x$  und  $y$  senkrecht zur optischen Achse liegen. Ein derartiges Diagramm der Objektkoordinaten läßt sich allerdings nur bei homogenen Objekten mit bekanntem Brechungsindex ermitteln, da in diesem Fall die optische Weglänge OWL proportional zu dem Produkt aus Brechungsindex und Objektdicke ist.

In der Fig. 3b ist die optische Weglänge OWL zweidimensional, d. h. als Funktion der senkrecht zur optischen Achse liegenden Richtungen  $x, y$  dargestellt. Ein derartiges Diagramm der optischen Weglänge ergibt sich bereits nach einer einzigen Messungen am Objekt (8), wobei natürlich zuvor die weiter oben erwähnte Referenzmessung zur Eliminierung der Abbildungsfehler der Optik durchzuführen ist.

In der Fig. 3c ist der Brechungsindex  $n$  orts aufgelöst als Funktion der senkrecht zur optischen Achse liegenden Koordinaten ( $x, y$ ) dargestellt. Ein derartiges Diagramm läßt sich grundsätzlich auf zwei verschiedenen Wegen erzeugen: Bei der ersten Möglichkeit werden Informationen über die Objektdicke als Funktion der Lateral-Koordinaten ( $x, y$ ) als bekannt vorausgesetzt. Hat das Objekt keine bekannte konstante Dicke, so können derartige Informationen mit Hilfe anderweitiger Messungen, beispielsweise mittels kraft- oder tunneltmikroskopischer Messungen, ermittelt sein und die Meßergebnisse in den Computer (16) eingegeben sein. Der Brechungsindex  $n$  an einer Objektstelle mit den Lateral-Koordinaten ( $x_0, y_0$ ) ergibt sich dann einfach durch Division der optischen Weglänge OWL an der selben Position mit den Lateral-Koordinaten ( $x_0, y_0$ ) durch die Objektdicke an dieser Stelle.

Die zweite Möglichkeit kommt dagegen ohne zusätzliche Messungen mit anderen Meßgeräten aus. Dazu wird das Objekt mit der Meßvorrichtung nach Fig. 1 mehrfach nacheinander bei unterschiedlichen Winkelstellungen des Objektes (8) vermessen und die im Zusammenhang mit der Fig. 1 erwähnte tomographische Auswertung durchgeführt. Nachfolgend werden die dabei ermittelten Brechungsindizes  $n_{ijk}$ , die zu identischen Lateral-Koordinate gehören und demzufolge Identische Indizes  $j$  und  $k$  aufweisen, aufsummiert. Diese Variante ist zwar etwas aufwendig hinsichtlich der Anzahl durchzuführender Messungen, jedoch ist dafür auch kein zusätzliches Meßgerät erforderlich.

Verzichtet man auf das Aufsummieren der zu Identischen Lateralkoordinaten zugehörigen Brechungsindizes, so können unmittelbar nach der tomographischen Auswertung auch entsprechende Diagramme des orts aufgelösten Brechungsindex  $n_{ijk}$  für beliebige Schnittebenen durch das Objekt erzeugt werden oder der Verlauf des Brechungsindex als Funktion der drei orthogonalen Objektkoordinaten ( $x, y, z$ ) als dreidimensionale Bilder beispielsweise in geeigneter Falschfarbendarstellung ausgegeben werden.

In der Fig. 3d ist die Dispersion  $dn/d\lambda$  als Funktion der Lateral-Koordinaten ( $x, y$ ) dargestellt. Dieses Diagramm ergibt sich dadurch, daß die Messungen für unterschiedliche Wellenlängen durchgeführt werden und die dabei festgestellte Änderung des Brechungsindex als Funktion der Lateral-Koordinaten durch die Änderung der Wellenlänge dividiert wird. Auch hier können wie im Falle des orts aufgelösten Brechungsindex entsprechende Diagramme der Dispersion für beliebige Schnittebenen durch das Objekt oder Diagramme der Dispersion als Funktion der drei orthogonalen Objektkoordinaten als dreidimensionale Bilder erzeugt werden.

Die Ausführungsbeispiele nach Fig. 1 und 2 sind Durchlichtanordnungen, die für transparente oder zumindest teilweise transparente Objekte geeignet sind.

In der Fig. 4 ist der vom Computer (16) (siehe Fig. 1) gesteuerte Meßablauf in Funktionsblöcken dargestellt. Nach dem Start der Messung im Funktionsblock (50) wird zunächst im Funktionsblock (51) die Referenzmessung zur Erfassung der Abbildungsfehler des optischen Systems (Messung 0) durchgeführt. Die Ergebnisse dieser Messung werden abgespeichert.

Im nachfolgenden Funktionsblock (52) wird der Benutzer abgefragt, welches von drei unterschiedlichen Meßzielen er auswählen möchte. Entscheidet sich der Benutzer für die optische Weglänge OWL so wird in einem nachfolgenden Schritt (53) eine einzige Messung mit einem Objekt im Strahlengang durchgeführt. Nachfolgend wird in einem Schritt (54) die laterale Ablage der Foki auf dem Detektorarray gegenüber der Referenzmessung (51) bestimmt. Unter Berücksichtigung der Brennweiten der Einzellinsen des Linsenarrays (14) ergibt sich daraus die optische Weglänge als Funktion der Lateral-Koordinaten ( $j, k$ ) ( $j$  und  $k$  entsprechen diskreten Werten der Lateral-Koordinaten ( $x, y$ )). In einem nachfolgenden Ausgabeschritt (55) wird die optische Weglänge OWL als Funktion der Lateral-Koordinaten als Diagramm nach Fig. 3b ausgegeben.

Entscheidet sich der Benutzer im Funktionsblock (52) für die Bestimmung des orts aufgelösten Brechungsindex  $n_{ijk}$ , so wird analog zum gerade beschriebenen Fall in einem Funktionsblock (56) wiederum eine Messung am Objekt durchgeführt und im nachfolgenden Funktionsblock (57) die Ablage der Foki auf dem Detektorarray gegenüber der Referenzmessung (51) ermittelt. Insoweit entsprechen die Funktionsblöcke (56) und (57) den Funktionsblöcken (53) und (54). Allerdings wird jetzt die ermittelte optische Weglänge  $OWL_{ijk}$  nicht ausgegeben sondern abgespeichert. In einem nachfolgenden Funktionsblock (58) wird überprüft, ob der Index  $i$ , der die Messungen zählt, bereits der Anzahl  $N$  der Volumenelemente entlang der Richtung der optischen Achse des das Objekt umschreibenden Würfels entspricht. Diese Anzahl  $N$  und die Kantenlänge  $d$  der Volumenelemente (siehe



Gl. 2) sind durch die geometrisch-optischen Parameter der Meßvorrichtung — die Anzahl der Einzellinsen des Linsenarrays (14), deren Abstände und den Vergrößerungsfaktor des afokalen Systems (12, 13) — definiert und als feste Größen im Computer (16) abgespeichert. Entspricht die Anzahl der durchgeführten Messungen nicht der Zahl N, so wird das Objekt mittels des drehbaren Objektisches um eine Achse senkrecht zur optischen Achse gedreht (Funktionsschritt 59) und nachfolgend solange weitere Messungen am Objekt (Funktionsschritte 56, 57) bei unterschiedlichen Drehwinkeln des Objektes durchgeführt, bis die Anzahl der durchgeführten Messungen der Anzahl N der Volumenelemente in Richtung der optischen Achse entspricht. Nachfolgend wird eine tomographische Auswertung im Funktionsblock (60), beispielsweise entsprechend der oben genannten Literaturstelle, durchgeführt. Das Ergebnis ist der Brechungsindex n als Funktion der kartesischen Koordinaten (i, j, k) ((i, j, k) entsprechen diskreten Werten der kartesischen Koordinaten (z, x, y)). Der nachfolgende Funktionsschritt (61) ist nur für die Dispensionsmessung interessant und wird in diesem Falle übersprungen; es wird gleich zur Datenausgabe (62) vorgesprungen. Die Brechungsindizes  $n_{ijk}$  können entweder für jeden Schnitt senkrecht zur optischen Achse (also für jeden i-Wert) als Diagramm nach Fig. 3c graphisch, als numerische Datentabelle oder als dreidimensionale Graphiken ausgegeben werden.

Entscheidet sich der Benutzer im Funktionsblock (52) für die Messung der Dispersion  $dn/d\lambda$ , so werden wie bei der Messung des orts aufgelösten Brechungsindex  $n_{ijk}$  die Funktionsblöcke (56, 57, 58, 59 und 60) in gleicher Weise durchlaufen. In diesem Funktionsmodus tritt jedoch die Abfrage im Funktionsblock (61), ob ein Zählindex 1 einer vorgegebenen Zahl M entspricht, in Wirkung. Entspricht der Zählindex 1 noch nicht der Zahl M, so wird in einem nachfolgenden Funktionsblock (63) der durchstimbare Monochromator auf die nächste gewünschte Wellenlänge  $\lambda_1$  eingestellt und die gesamte Meßprozedur mit mehreren Messungen bei unterschiedlichen Winkelstellungen des Objektes wiederholt. Aus der Vielzahl an Messungen wird für jede Wellenlänge  $\lambda_1$  der orts aufgelöste Brechungsindex  $n_{ijk}$  bestimmt und nachfolgend für die Datenausgabe im Funktionsblock (62) der Quotient aus der orts aufgelösten Brechungsindex-Änderung und der Wellenlängen-Änderung gebildet und das Ergebnis als Diagramm nach Fig. 3d dargestellt.

Bei den in den Figuren dargestellten Ausführungsbeispielen ist stets ein einziges Mikroskopobjektiv (12) vorgesehen. Es ist jedoch vorteilhaft, das Mikroskopobjektiv (12), wie bei Mikroskopen üblich, beispielsweise mittels eines Objektiv-Revolver austauschbar zu gestalten. Dadurch ist die Vergrößerung des afokalen Systems aus Mikroskopobjektiv (12) und Achromaten (13) variierbar, so daß die laterale Größe des Meßfeldes an das gewünschte Objekt anpaßbar ist. Bei großen lateralen Meßfeldern wird jedoch die laterale Auflösung geringer, da die Anzahl der bei einer Einzelmessung gemessenen lateralen Teilfelder gleich bleibt. Denn diese hängt einzig und allein von der Anzahl der Linsen im Linsenarray (14) ab. Bei der orts aufgelösten Vermessung sehr kleiner mikroskopischer Objekte können insbesondere auch hochvergrößernde Ölimmersionsobjektive eingesetzt werden.

Bei einem Wechsel der Vergrößerung des afokalen Systems ist natürlich bei der tomographische Auswertung (siehe Gl. 2) auch die Kantenlänge d der Volumenelemente  $V_{ijk}$  entsprechend anzupassen. Dieses kann entweder manuell — durch Änderung des im Computer abgespeicherten Wertes für die Vergrößerung des afokalen Systems — oder automatisch — durch einen die Brennweite des eingeschalteten Mikroskopobjektivs erkennenden Codeleser am Objektivrevolver — erfolgen. Im letzteren Fall ist im Computer eine Tabelle der möglichen Vergrößerungsfaktoren abgespeichert, aus der jeweils der zum eingeschalteten Objektiv zugehörige Wert j nach Stellung des Objektivrevolvers ausgewählt wird.

Die laterale Ortsauflösung entspricht der konventioneller Mikroskope, da auch bei der erfindungsgemäßen Vorrichtung das System aus Mikroskopobjektiv und Achromat ein vergrößertes reelles Bild erzeugt, das bei der erfindungsgemäßen Vorrichtung allerdings in der Ebene des Mikrolinsenarrays liegt.

Da das Objekt bei der erfindungsgemäßen Vorrichtung in geometrisch optischer Näherung mit parallelem Licht beaufschlagt wird, können mit der erfindungsgemäßen Vorrichtung auch dickere Objekte untersucht werden. Dadurch können beispielsweise auch räumlich lokalisierte Brechungsindex-Schwankungen im Inneren von dicken Glasproben bestimmt werden.

Bei der tomographischen Meßergebnis-Interpretation wird allerdings vorausgesetzt, daß im Inneren des Objektes der Beleuchtungsstrahlengang nachwievor annähernd kollimiert bleibt. Diese Voraussetzung ist bei dickeren Objekten nur erfüllt, wenn der Brechungsindex sich über Strecken, die in der Größenordnung der Lichtwellenlänge liegen, praktisch nicht ändert. Bei feiner strukturierten Objekten wird die tomographische Ergebnis-Interpretation aufgrund der auftretenden Beugungseffekte fehlerhaft.

Ein besonderer Vorteil der erfindungsgemäßen Vorrichtung ist dessen Unempfindlichkeit gegenüber äußeren Störungen wie Erschütterungen. Die Ursache dafür ist, daß in die Messung der Wellenfrontdeformation nicht die absolute Phase der Wellenfront wie bei interferometrischen Anordnungen eingeht. Dadurch ist die erfindungsgemäße Vorrichtung insbesondere auch im industriellen Einsatz, z. B. in der Qualitätskontrolle, einsetzbar.

Beispielhafte Anwendungsgebiete der erfindungsgemäßen Vorrichtung sind die Messung des Brechungsindex-Verlaufs von Schlieren in Gläsern, beispielsweise in Objektiv-Rundstücken oder in Mikrolinsen, die Bestimmung der Brechungsindex-Profile von Lichtleitfasern oder von Faserschmelzkopplern, die Bestimmung des Brechungsindex-Verlaufs von in Lichtleitfasern eingebrachten Bragg-Beugungsgittern, des räumlichen Verlaufs von Brechungsindex und Dispersion von Organellen in biologischen Zellen, beispielsweise des Zellkerns, oder des Brechungsindex-Verlaufs von Komponenten der diffraktiven Optik.

#### Patentansprüche

1. Vorrichtung zur orts aufgelösten Vermessung der von einem mikroskopischen Objekt im Durchlicht erzeugten Wellenfrontdeformationen mit
  - einer Beleuchtungsoptik (1—7; 21—27), die einen Beleuchtungsstrahlengang erzeugt,



- einem Objektträger (9, 10) zur Aufnahme des Objektes im Beleuchtungsstrahlengang,
  - einem Linsenarray (14) mit einer Vielzahl von Linsen gleicher Brennweite, und
  - einem dem Linsenarray (14) nachgeordneten Detektorarray (15), wobei das Detektorarray (15) in der Brennebene der Einzellinsen des Linsenarrays (14) angeordnet ist.
2. Vorrichtung nach Anspruch 1, wobei zwischen dem Objektträger (9, 10) und dem Linsenarray (14) ein afokales optisches System (12, 13) angeordnet ist, dessen objektseitige Brennweite ( $f_1$ ) wesentlich kleiner als dessen detektorseitige Brennweite ( $f_2$ ) ist.
  3. Vorrichtung nach Anspruch 2, wobei das afokale System aus einem Mikroskopobjektiv (12) und einem Achromaten (13) besteht, und wobei das Mikroskopobjektiv (12) objektseitig angeordnet ist.
  4. Vorrichtung nach Anspruch 2 oder 3, wobei das Linsenarray (14) in der austrittseitigen Brennebene des afokalen Systems (12, 13) und die detektorseitige Oberfläche (8a) des Objektes (8) in dessen objektseitiger Brennebene angeordnet ist.
  5. Vorrichtung nach einem der Ansprüche 1—4, wobei die Beleuchtungsoptik (1—7) einen kollimierten Strahlengang erzeugt und der Objektträger (9, 10) im kollimierten Strahlengang der Beleuchtungsoptik angeordnet ist.
  6. Vorrichtung nach einem der Ansprüche 1—5, wobei der Objektträger (9, 10) um eine zur optischen Achse der Beleuchtungsoptik senkrechte Achse (11) drehbar ist.
  7. Vorrichtung nach einem der Ansprüche 1—6, wobei das Linsenarray (14) und das Detektorarray (15) jeweils zweidimensional ausgeführt sind.
  8. Vorrichtung nach einem der Ansprüche 1—7, wobei ein Computer (16) mit einem Computer-Programm vorgesehen ist, das die lateralen Ablagen der auf dem Detektorarray (15) erzeugten Foki von den Lagen der Foki im Falle des Einfalls einer ebenen Wellenfront ermittelt und diese lateralen Ablagen zur graphischen Darstellung als zweidimensionales Bild ausgibt.
  9. Vorrichtung nach Anspruch 8, wobei ein Computer-Programm vorgesehen ist, das aus den lateralen Ablagen die optische Weglänge durch das mikroskopische Objekt (8) orts aufgelöst bestimmt und zur graphischen Darstellung als zweidimensionales Bild ausgibt.
  10. Vorrichtung nach Anspruch 8, wobei das Computer-Programm aus den bei unterschiedlichen Drehwinkelstellungen des Objektes (8) ermittelten lateralen Ablagen der Foki ein dreidimensionales Bild des Brechungsindex des mikroskopischen Objektes (8) ermittelt und zur graphischen Darstellung ausgibt.
  11. Vorrichtung nach einem der Ansprüche 1—10, wobei eine monochromatisches Licht erzeugende Lichtquelle (1; 21—24) vorgesehen ist.
  12. Vorrichtung nach Anspruch 11, wobei die Lichtquelle (21—24) durchstimmbar ist und der Computer (16) ein die eingestellte Lichtwellenlänge charakterisierendes Signal erhält.
  13. Verfahren zur Bestimmung der von einem mikroskopischen Objekt (8) erzeugten Wellenfrontdeformationen, wobei das mikroskopische Objekt (8) mit einer einfallenden Wellenfront beaufschlagt und die vom Objekt (8) im Durchlicht verursachte Wellenfrontdeformation mittels eines Shack-Hartmann-Wellenfrontsensors (14, 15) ermittelt wird.
  14. Verfahren zur Bestimmung des räumlichen Brechungsindex und/oder Dispersionsverlauf eines mikroskopischen Objektes (8), wobei das Verfahren nach Anspruch 13 bei unterschiedlichen Winkelstellungen des Objektes (8) relativ zur optischen Beleuchtungsachse und/oder bei unterschiedlichen Wellenlängen des Lichts, mit dem das Objekt (8) beaufschlagt wird, durchgeführt wird.

Hierzu 4 Seite(n) Zeichnungen

- Leerseite -

FIG. 1

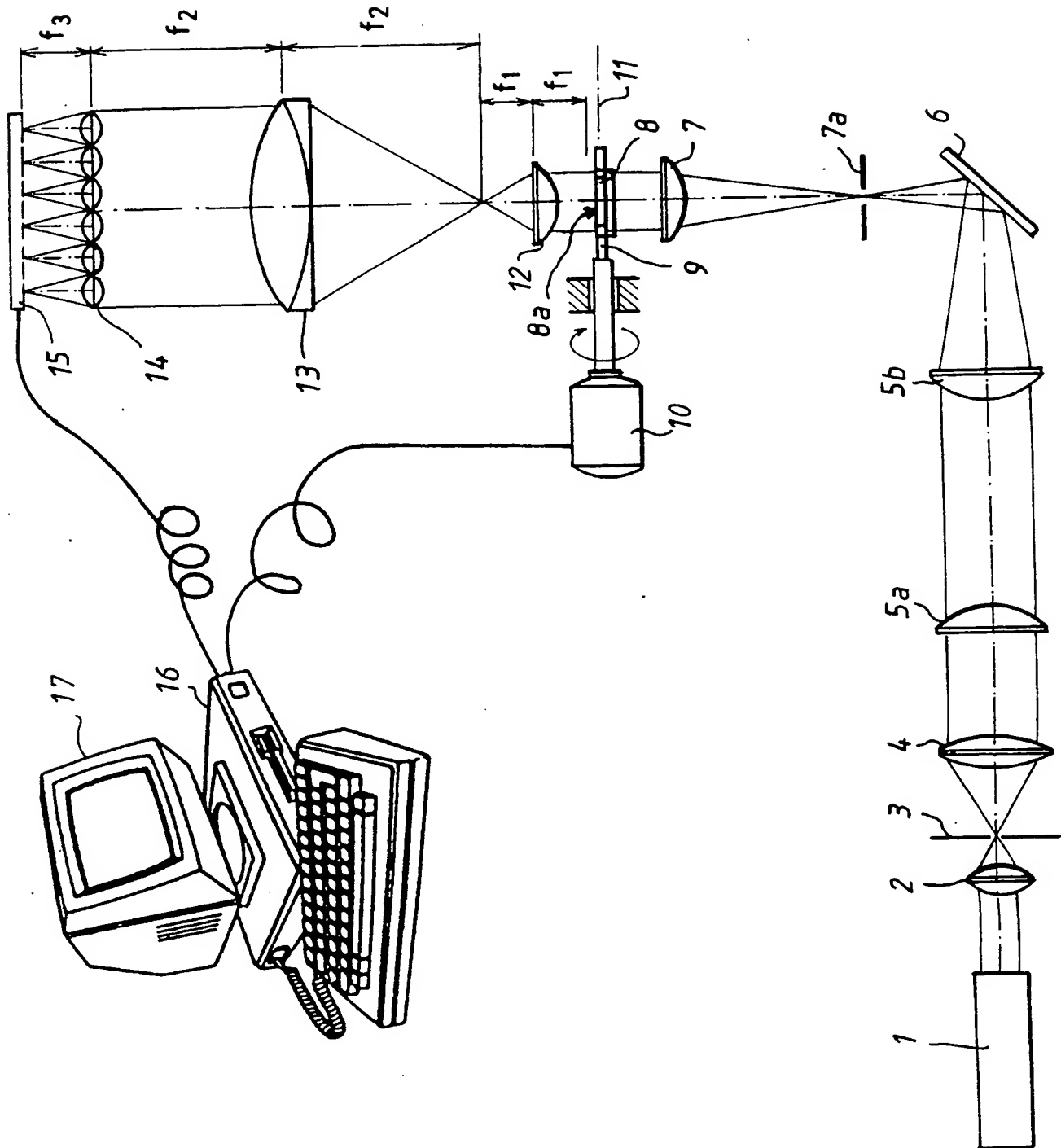


FIG. 2

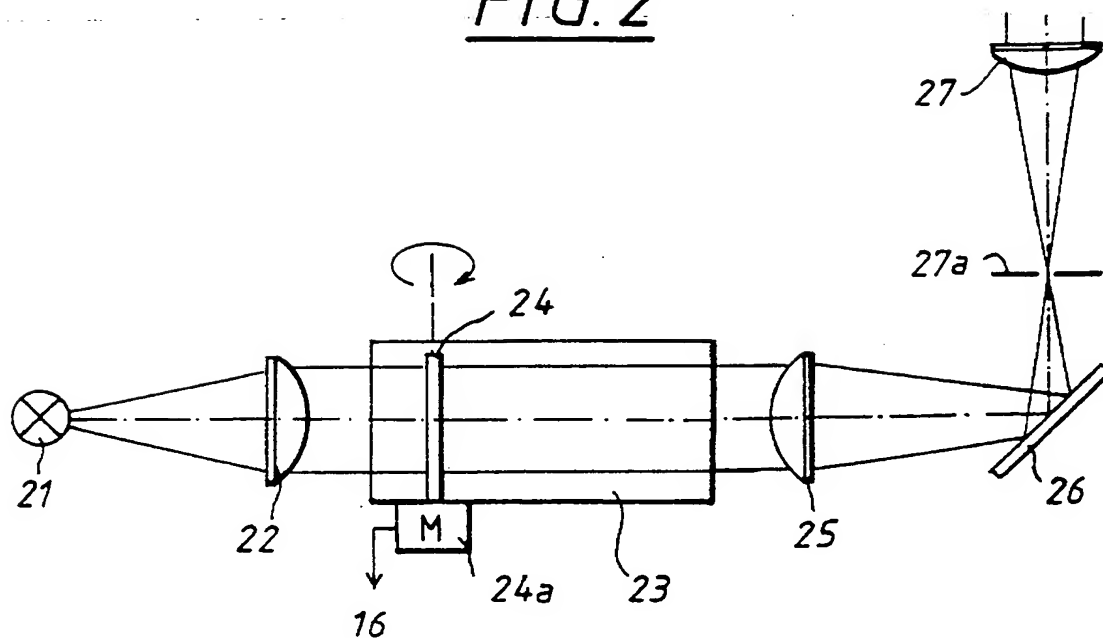


FIG. 3a

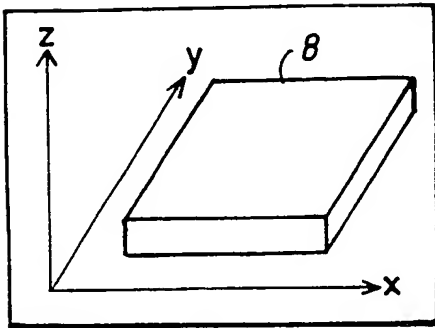


FIG. 3c

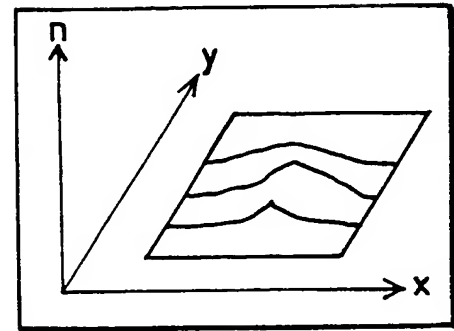


FIG. 3b

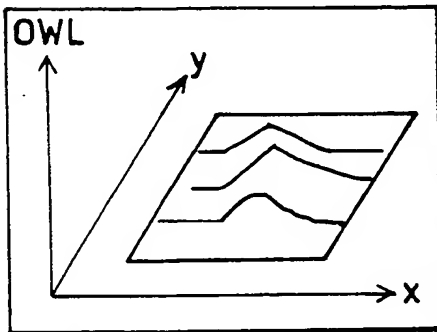


FIG. 3d

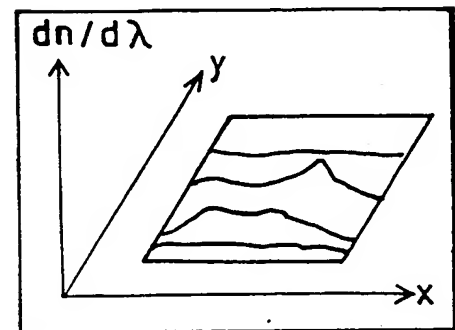


FIG. 4

